

对流层气溶胶和水汽的车载激光雷达系统的探测

吕炜煜^{1,2}, 苑克娥¹, 魏旭³, 刘李辉³, 王邦新¹, 吴德成¹, 胡顺星¹, 王建国², 马振富⁴

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024; 4. 中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001)

摘要: 利用研制的一套具备昼夜测量能力的新型车载大气探测激光雷达系统为试验工程和环境监测提供应用研究。该激光雷达系统由水平测量模块和垂直测量模块构成, 可通过接收激光与大气中气溶胶粒子、水汽分子、氮气分子作用的米散射和拉曼散射信号, 反演大气水平能见度、垂直的气溶胶消光系数和水汽混合比。并可实现昼夜连续观测, 实际测量结果与对比实验表明, 大气水平能见度的测量误差小于 10%, 6 km 以下垂直大气气溶胶的测量误差小于 10%, 水汽的测量误差最大不超过 20%, 能够满足大气参数测量的实际需求。

关键词: 大气气溶胶; 水汽; 激光雷达; 水平能见度; 混合比; 散射系数

中图分类号: TN249; P427.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0330001

A mobile lidar system for aerosol and water vapor detection in troposphere with mobile lida

Lv Weiyu^{1,2}, Yuan Ke'e¹, Wei Xu³, Liu Lihui³, Wang Bangxin¹, Wu Decheng¹,
Hu Shunxing¹, Wang Jianguo², Ma Zhenfu⁴

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China; 4. Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng 137001, China)

Abstract: A new mobile lidar system with day and night capability has been developed for the application research of test engineering and environmental monitoring. The lidar system was composed of a horizontal measurement module and vertical measurement module, which can receive the Mie scattering and Raman scattering signal that come from the action of laser and aerosol particles, water vapor molecule, nitrogen in atmosphere. Atmospheric horizontal visibility, vertical aerosol extinction coefficient and water vapor mixing ratio can be retrieved. The lidar system can provide continuous observation day and night, the actual measurement results and comparison experiments show that the measurement error of

收稿日期: 2015-07-05; 修订日期: 2015-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(41475001); 中国科学院知识创新方向性项目(KJCX2-EW-N07)

作者简介: 吕炜煜(1974-), 男, 博士生, 主要从事激光和红外辐射传输应用方面的研究。Email: lwym@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 胡顺星(1966-), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事激光雷达大气探测技术方面的研究。Email: sxhu@aiofm.ac.cn

通讯作者: 苑克娥(1979-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事激光雷达的大气参数测量方面的研究。Email: keyuan@aiofm.ac.cn

atmospheric horizontal visibility is less than 10%, and the error of the vertical aerosol is below 10% under the height of 6 km, and the maximum error of water vapor is not exceeding 20%. The mobile lidar system can be provided to meet the various application requirements for atmospheric parameters measurement.

Key words: atmospheric aerosol; water vapor; lidar; horizontal visibility; mixture ratio; scattering coefficient

0 引言

激光在大气中传输时,必须考虑激光与大气之间的相互作用,其中大气对激光的散射和吸收将引起激光功率的衰减,由此造成图像模糊和通信链路质量下降,并对激光工程应用中系统效能的发挥带来影响。为保证激光技术的可靠应用,必须了解应用地区的大气光学特性^[1-2]。大气对流层中的水汽、气溶胶粒子对激光的吸收和散射作用使其成为激光大气传输的重要消光因素,并且水汽和气溶胶粒子会对地球-大气系统的辐射收支产生重要影响^[3-5]。因此,对不同地域特征的地区开展水汽、气溶胶粒子光学特性的测量,既可以为系统设计和效能评估提供参考,也可以为环境监测、大气科学研究提供数据支撑。

利用激光雷达技术开展水汽和气溶胶的探测,具有距离长、精度高和连续性好的优点。中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心于 2010 年研制了一套可昼夜连续观测的车载激光雷达系统,该系统主要由水平测量模块和垂直测量模块构成,能够分别满足水平能见度和气溶胶消光系数及水汽混合比垂直分布廓线的测量。

文中介绍了车载激光雷达系统的测量原理、总体结构和各测量模块的基本功能,并对该系统在干旱地区的应用进行了分析和讨论,给出了初步结果。

1 系统测量原理

激光雷达以激光作为光源,所发射的激光在大气中传输时,通过与大气中的气溶胶粒子、空气分子、水汽的相互作用发生 Mie 散射、Rayleigh 散射和 Raman 散射,产生包含气溶胶粒子和气体分子有关信息的散射信号,激光雷达可通过探测到的散射信号,结合激光雷达方程反演出大气水平能见度、垂直

传输路径上的气溶胶消光系数和水汽混合比。车载激光雷达系统使用到的激光雷达方程有 Mie 散射和 Raman 散射激光雷达方程,其中米散射激光雷达在高度 z 处接收的大气后向散射回波功率 $P(z)$ 由 Mie 散射激光雷达方程表示为^[6]:

$$P(Z)=ECZ^{-2}[\beta_1(Z)+\beta_2(Z)]T_1^2(Z)T_2^2(Z) \quad (1)$$

式中: E 为激光发射功率, W ; C 为米散射激光雷达系统常数, $km^3 \cdot sr^{-1}$; $\beta_1(Z)$ 和 $\beta_2(Z)$ 分别是高度 z 处大气气溶胶和大气分子的后向散射系数, $km^{-1} \cdot sr^{-1}$; $T_1(Z)=\exp[-\sum \alpha_1(z)dz]$ 为米散射激光雷达与高度 z 之间的大气气溶胶透过率, $T_2(Z)=\exp[-\sum \alpha_2(z)dz]$ 为相应的大气分子透过率; $\alpha_1(Z)$ 和 $\alpha_2(Z)$ 分别为高度 z 处大气气溶胶和大气分子消光系数, km^{-1} 。对于水平模块测量水平能见度,可以假定水平路径大气均匀分布,采用斜率法处理公式(1);如果是垂直模块测量垂直路径的气溶胶消光系数(后向散射系数),一般晴空条件下采取 Fernald 方法反演的大气气溶胶后向散射系数,但该方法在气溶胶层和云层中,由于受到假设的激光雷达比的影响,其误差往往会比较大;而 Raman-Mie 方法正适合于计算气溶胶层和云层中的后向散射系数,在这些层中计算的气溶胶(或云)后向散射系数的相对误差较小。对于在相对洁净的对流层中上部,由于受到 Raman 散射回波信号信噪比的影响,利用 Raman-Mie 方法计算的气溶胶后向散射系数的误差较大,而利用 Fernald 方法却能比较好地反演出该高度范围内的气溶胶后向散射系数。因此,将 Fernald 方法和 Raman-Mie 方法联合使用来反演气溶胶后向散射系数的垂直分布能够满足实际应用所需。

垂直模块中探测水汽廓线则是利用 Raman 散射原理,通过使用探测大气中 H_2O 和 N_2 的接收通道,获取水汽和氮气的拉曼回波信号,计算大气水汽混

合比。大气中水汽混合比 $M(z)$ 的定义为^[7-10]:

$$M(z) = \frac{n_w(z)}{n_{air}(z)} \frac{m_w}{m_{air}} \quad (2)$$

式中: $n_w(z)$ 和 $n_{air}(z)$ 分别为水汽和干空气数密度随高度的分布; m_w 和 m_{air} 分别为水汽和干燥空气的分子量。探测水汽和氮气分子的 Raman 方程分别为:

$$S_{w,\lambda_w}(z) = \frac{k_{w,\lambda_w}}{z^2} \sigma_w(\pi) n_w(z) q(\lambda_0, z) q(\lambda_w, z) \quad (3)$$

$$S_{N,\lambda_N}(z) = \frac{k_{N,\lambda_N}}{z^2} \sigma_N(\pi) n_N(z) q(\lambda_0, z) q(\lambda_N, z) \quad (4)$$

式中: $S_{w,\lambda_w}(z)$ 、 $S_{N,\lambda_N}(z)$ 分别为高度 z 处水汽和氮气分子的 Raman 后向散射回波信号; λ_0 、 λ_w 、 λ_N 分别为发射的激光波长、水汽和氮气分子的 Raman 散射波长; k_{w,λ_w} 和 k_{N,λ_N} 分别为激光雷达中水汽和氮气分子 Raman 通道的系统常数; $\sigma_w(\pi)$ 和 $\sigma_N(\pi)$ 分别为水汽和氮气分子的 Raman 后向散射微分截面; $n_N(z)$ 为高度 z 处氮气分子的数密度; $q(\lambda_0, z)$ 、 $q_w(\lambda_w, z)$ 和 $q_N(\lambda_N, z)$ 分别为大气在高度 z 处在 λ_0 、 λ_w 和 λ_N 上的大气透过率。

根据公式(2)、(3)和(4)可以将水汽混合比写成:

$$w(z) = \frac{k_{N,\lambda_N}}{k_{w,\lambda_w}} \frac{\sigma_N(\pi)}{\sigma_w(\pi)} \frac{m_w}{m_{air}} \frac{n_N(z)}{n_{air}(z)} \frac{q(\lambda_N, z)}{q(\lambda_w, z)} \frac{O_{N,\lambda_N}(z)}{O_{w,\lambda_w}(z)} \frac{S_{w,\lambda_w}(z)}{S_{N,\lambda_N}(z)} \quad (5)$$

定义系统标定常数 C_w 和透过率修正函数 $\Delta_q^w(z)$:

$$C_w = \frac{k_{N,\lambda_N}}{k_{w,\lambda_w}} \frac{\sigma_N(\pi)}{\sigma_w(\pi)} \frac{m_w}{m_{air}} \frac{n_N(z)}{n_{air}(z)} \quad (6)$$

$$\Delta_q^w(z) = \frac{q(\lambda_N, z)}{q(\lambda_w, z)} \quad (7)$$

则水汽混合比可以简写为:

$$w(z) = C_w \Delta_q^w(z) \frac{O_{N,\lambda_N}(z)}{O_{w,\lambda_w}(z)} \frac{S_{w,\lambda_w}(z)}{S_{N,\lambda_N}(z)} \quad (8)$$

若已知标定常数 C_w 、大气透过率修正函数 $\Delta_q^w(z)$ 和氮气分子和水汽分子 Raman 通道的几何因子的比值 $O_{N,\lambda_N}/O_{w,\lambda_w}$ ，通过测量的水汽和氮气分子的 Raman 后向散射信号的比值 $S_w(z)/S_N(z)$ 就可以计算出水汽混合比 $w(z)$ ^[11-14]。

2 系统结构和基本参数

图 1 给出了车载激光雷达系统的布局情况, 水平测量模块和垂直测量模块安装在一辆箱式卡车的车厢内, 约占车厢体积的三分之一。测量模块由包含信号探测器在内的光学单元、数据采集控制单元以及包括激光器电源在内的电气设备三部分构成。水平测量模块的光学单元、数据采集单元的主要器

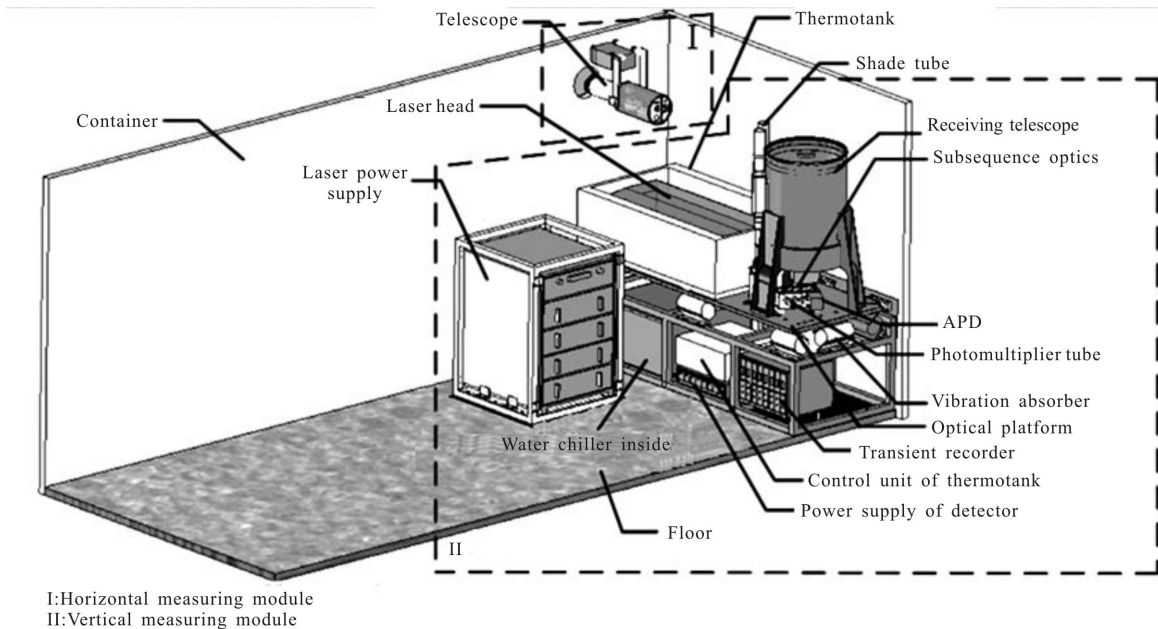
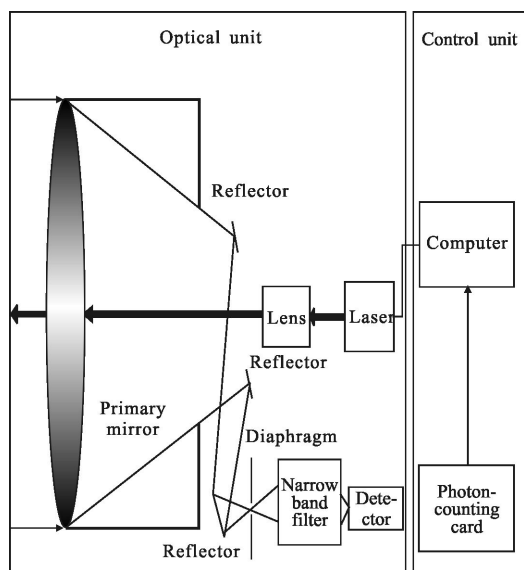


图 1 激光雷达系统布局图(侧视)

Fig.1 Layout of lidar system inside the container(side view)

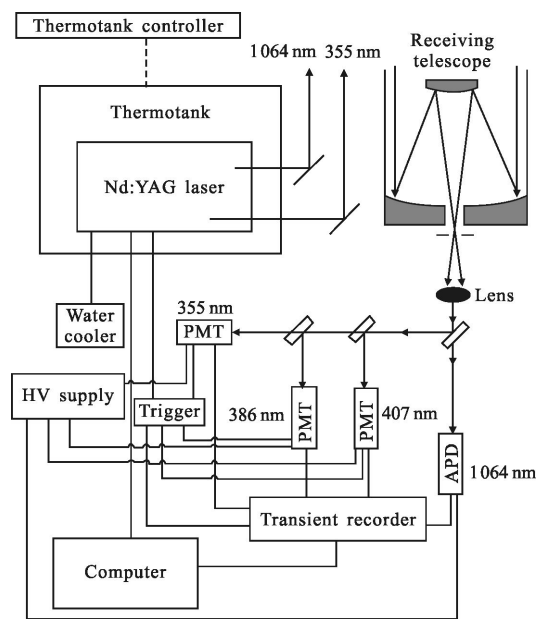
件集成固定在车厢前部的顶舱，沿水平测量模块出射光路方向的车厢侧壁有开口 0.7 m×0.7 m 的窗户，便于光路通畅和防尘，532 nm 波长的激光由此发射到大气中，大气后向散射光也由此处被望远镜接收，进行大气水平能见度的测量，可根据需要决定是否开启窗户进行水平能见度测量。垂直测量模块的光学单元由激光器、发射光路、望远镜、后继光路、探测器组成，数据采集控制单元由瞬态记录仪、继电器卡、触发器、工控机及控制软件组成，电器设备主要包括激光器电源、探测器电源、水冷机、空调机等。垂直测量模块的接收望远镜正上方的厢顶开有 1.1 m×1.1 m 的天窗，用于大气气溶胶消光系数和水汽混合比垂直分布的探测。垂直模块主体部分固定在一个光学平台上，光学平台通过隔振器与下面的支撑框架相连，光学平台的支撑框架则直接固定在车厢地板中的预埋铁板上，则可减小垂直方向和水平方向的振动，另外，还利用垂向压缩支撑的隔振器将光学平台与车厢前壁内预埋的铁板相连，可保证光学平台在水平方向上受到较大冲击时（如车辆突然启动或紧急制动）的稳定性，做到尽可能降低车厢振动对测量精度造成的影响^[15]。

图 2 是激光雷达测量系统水平测量模块和垂直测量模块的结构示意图，表 1 列出了车载激光雷达系统的主要技术指标。图 2(a)表明：水平测量模块的 Nd:YAG 激光器发出的 532 nm 波长的激光经透镜组



(a) 水平测量模块

(a) Horizontal measuring module



(b) 垂直测量模块

(b) Vertical measuring module

图 2 雷达系统结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of lidar system

和主镜扩束，获得满足发散角指标的发射光束，从主镜中心发射出去，经过大气气溶胶和大气分子作用的后向散射光被主镜接收，经过两次反射后聚焦在微孔光阑处，然后通过窄带滤光片进入探测器。主镜采用了直径为 150 mm 的非球面镜，对于发射来说，由透镜组与主镜构成光束扩束器，对来自激光器的光束实现扩束。由于发射与接收是用同一块主镜来完成的，从设计上减少了机械件和光学件，避免了机械应力受环境变化对光路的影响，提高了光路的长期稳定性、可靠性，避免了过多占用空间，便于系统的安装调试^[16-17]。

图 2(b)说明：垂直测量模块采用 Nd:YAG 激光器(354.7 nm 和 1 064.2 nm)作为光源，同时接收空气分子与大气气溶胶的弹性散射回波信号(354.7 nm 和 1 064.2 nm)、水汽分子和氮气分子的 Raman 散射回波信号(407.4 nm 和 386.7 nm)，来测量大气气溶胶的消光系数(354.7 nm)、后向散射系数(354.7 nm 和 1 064.2 nm)和水汽混合比的昼夜时空分布。通过采用高脉冲能量紫外激光器、大口径接收望远镜、发射光路紧靠望远镜、窄带宽滤光片、大动态范围的数据采集系统等综合技术措施来满足测量要求^[15,18]；实现

白天测量 3 km(夜间 6 km)以下或边界层中的水汽混合比的垂直分布测量以及近地面至 6 km 高度的气溶胶后向散射系数(消光系数)。

表 1 车载激光雷达系统主要技术指标

Tab.1 Main specifications of mobile lidar system

System parameters	Horizontal module value	Vertical module value
Transmitter optics		
Laser	Nd:YAG	Nd:YAG
Wavelength/nm	532	355/1 064
Pulse energy/mJ	10 ⁻²	400/400
Repetition ratio/Hz	2 500	30
Divergence/mrad	0.1	0.5
Width/ns	25	3-7/5-9
Receiver optics		
Type	Transmission telescope(primary mirror)	Cassegrain
Diameter/m	0.1	0.45
Field of view/mrad	0.2	1
Bandwidth of filter /nm	0.3	0.3/354.7 & 386.7 & 407.4;0.5/1064.2
Detector	CPM	PMT/APD
Data acquisition and control		
Data acquisition	Multichannel photon-counting card	TR160-20
Computer	IPC	IPC

3 测量数据分析

车载激光雷达探测系统一般根据工程应用和气象观测的需要择机进行相关大气参数测量,测量时机一般选择在能见度较好、晴朗少云无复杂天气(如雷电、大风、降水)的夜晚或白天进行,水平能见度测量时间为 5~6 min;垂直大气气溶胶消光系数和垂直水汽混合比测量时间为 6 min 左右,对二者的测量同时进行。

3.1 水平能见度测量结果分析

图 3 给出 2010 年 9 月 1 日激光雷达水平测量模块和相距 1 km 的 Vaisala FD-12 能见度仪的测量

对比结果。为对比方便起见,均对原始测量结果采取小时算术平均处理。考虑到 FD-12 测量的中心波长为 875 nm,不同波长与能见度之间的关系可用 Kruse 经验公式表示^[19-21],图 3 给出了根据经验公式将激光雷达水平测量模块 532 nm 的测量结果转换到 875 nm 的计算结果。可以看出,两套仪器测量结果的变化趋势基本一致,激光雷达水平测量模块的测量结果位于 6~18 km 之间,FD-12 的测量结果位于 11~30 km 之间。两套仪器均表现出在日出前和日落后的水平能见度较小,相同时段测量结果相差不大,日出后和日落前的测量结果对比则表现略有不同,激光雷达水平测量模块 532 nm 测量结果转换到 875 nm 的计算结果与 FD-12 相比,日出前和日落后的水平能见度的差别较小,日出后和日落前的水平能见度的差别略大,但出现差别略大的时段都是水平能见度较好的时段。

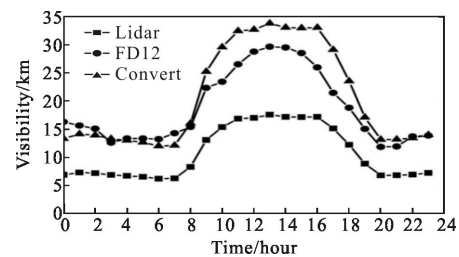


图 3 水平能见度的结果比较

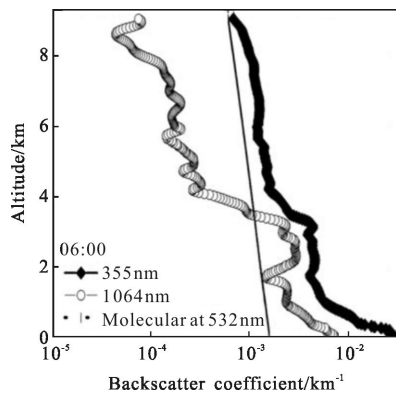
Fig.3 Comparison of horizontal visibility

造成结果出现差异的可能原因有三种:两种测量仪器的测量原理不同,激光雷达水平测量模块采用后向散射的测量原理,FD-12 则是采用前向散射测量的测量原理;两测量仪器的测量地点略有差别,空间差异会带来气溶胶分布的差异;两测量仪器的测量高度略有差异,激光雷达水平测量模块的光路高度约为 3.0 m,FD-12 测量高度约在距离地面 1.6 m 的高度,不同高度的气溶胶分布会有所不同。

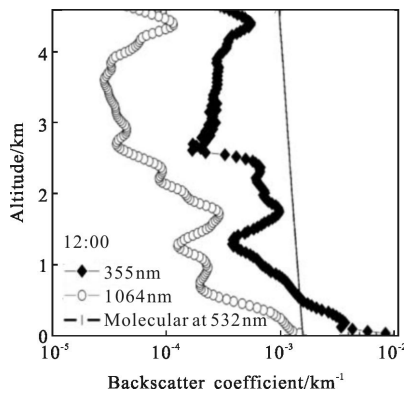
3.2 垂直大气气溶胶后向散射系数

图 4(a)给出 2010 年 9 月 1 日在测量地区夜间气溶胶粒子在 355 nm 和 1 064 nm 的后向散射系数的垂直分布情况,可以看出在夜间白天气溶胶的空间分布具有较为丰富的层次结构,有效测量高度达到 8 km 以上;图 4(b)给出 2012 年 9 月 25 日白天气溶胶粒子在 355 nm 和 1 064 nm 的后向散射系数的垂直分布情况,有效测量高度可达到 4 km 以上。这

说明该类型激光雷达垂直测量模块对垂直大气气溶胶的探测符合指标要求。



(a) 夜间
(a) Nighttime



(b) 白天
(b) Daytime

图 4 后向散射系数分布廓线

Fig.4 Vertical profiles of aerosol backscatter coefficients

3.3 垂直大气水汽混合比

图 5 给出两种测量方式对 2010 年 9 月 9 日 08:00 在测量地域垂直大气水汽混合比的测量结果, 分别使用了相距 1.1 km 的激光雷达垂直测量模块和采用 L 波段 702B 测风雷达跟踪的 GZZ10 数字探空仪, 从整个探测高度范围来看, 两种测量仪器的测量结果具有一定程度的一致性, 特别是在水汽混合比出现偏折变化的高度上趋势较为一致。水汽混合比出现偏差的可能原因有:(1) 测量区域位于干旱地区, 空气中水汽含量较低, 会造成测量结果上出现误差, 特别是对于数字探空仪采用温湿感应器件, 响应速度相对较慢, 会造成从高湿到低湿的过程中测量结果偏大, 而从低湿到高湿的过程中测量结果偏小;

(2) 在测量高度较高水汽含量较低的情况下, 由于激光雷达接收的水汽后向散射光信号较弱并且背景信号较强, 造成信噪比偏低, 形成较大的测量误差;(3) 在对流层的不同高度上始终存在空气的水平流动, 造成数字探空仪不可能完全测量垂直方向上的水汽混合比, 所获取的测量结果反映的必然是一定斜距一定高度上的水汽情况, 并且随着高度的增加, 斜距可能增大, 所反映的测量点的水汽情况会与垂直方向上的结果出现较大偏差。对比结果与误差分析表明, 激光雷达垂直测量模块测量水汽混合比的在 5 km 以下, 激光雷达测量的水汽混合比误差主要来自标定常数的误差;而在 5 km 以上, 激光雷达测量的水汽混合比误差主要来源于 Raman 散射回波信号中的噪声。

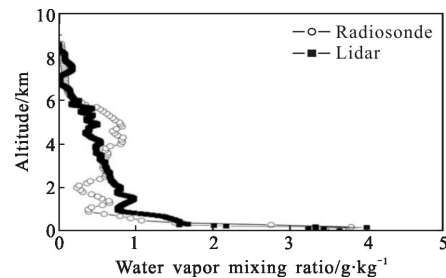


图 5 雷达和探空仪测量的水汽混合比
Fig.5 Water vapor profile measured by lidar and radiosonde

4 结论

通过介绍所研制的一套用于探测大气气溶胶和水汽的车载激光雷达系统, 叙述了激光雷达系统水平测量模块和垂直测量模块的工作原理, 给出了测量模块的总体结构和技术参数。该套激光雷达系统采取模块化设计, 具有结构紧凑、功能多样和探测速度快等优点, 可以昼夜对大气水平能见度和对流层一定高度范围内垂直气溶胶进行连续观测, 并且可对夜晚对流层中部和白天边界层内水汽含量进行测量, 其测量结果与其他测量仪器结果较好的吻合。该激光雷达现已用于对大气参数的常规观测和工程应用中。

参考文献:

[1] Rao Ruizhong, Qiao Yanli, Wei Heli, et al. Research and application on properties of atmosphere in typical regions of China[J]. *Journal of Atmospheric and Enviromental Optics*,

- 2007, 2(6): 401–408. (in Chinese)
 饶瑞中, 乔延利, 魏合理, 等. 中国典型地区大气光学特性及其应用[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 401–408.
- [2] Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [3] Xie Chenbo, Mao Minjuan, Yue Guming, et al. New mobile lidar for the measurement of tropospheric aerosol [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26 (11): 1973–1976. (in Chinese)
 谢晨波, 毛敏娟, 岳古明, 等. 新型车载式激光雷达探测对流层气溶胶[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(11): 1973–1976.
- [4] Xie Chenbo, Zhou Jun, Yue Guming, et al. New mobile Raman lidar for measurement of tropospheric water vapor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(9): 1281–1286. (in Chinese)
 谢晨波, 周军, 岳古明, 等. 新型车载式拉曼激光雷达测量对流层水汽[J]. 光学学报, 2006, 26(9): 1281–1286.
- [5] Zhou Jun, Yue Guming, Jin Chuanjia, et al. Two-wavelength Mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(10): 1412–1417. (in Chinese)
 周军, 岳古明, 金传佳, 等. 探测对流层气溶胶的双波长米氏散射激光雷达[J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1412–1417.
- [6] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observation; some comments[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652–653.
- [7] Yan Jixiang, Gong Shunsheng, Liu Zhisheng. Environmental Monitoring Lidar [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
 阎吉祥, 龚顺生, 刘智深. 环境监测激光雷达 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [8] Wang Yufeng, Hua Dengxin, Mao Jiandong, et al. A detection of atmospheric relative humidity profile by UV Raman lidar [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative*, 2011, 112: 214–219.
- [9] Behrendt Andreas, Wulfmeyer Volker. Combining water vapor DIAL and rotational Raman lidar for humidity, temperature, and particle measurements with high resolution and accuracy [C]//SPIE, 2003, 5154: 61–64.
- [10] Whiteman D N. Examination of the traditional Raman lidar technique. II. Evaluating the ratio for water vapor and aerosols[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(15): 2593–2608.
- [11] Whiteman D N, Melfi S H, Ferrare R A. Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(16): 3068–3082.
- [12] Xie Chenbo, Zhou Jun, Yue Guming, et al. Mobile lidar system for measuring tropospheric aerosol and water vapor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (3): 365–368. (in Chinese)
 谢晨波, 周军, 岳古明, 等. 测量大气气溶胶和水汽的车载式激光雷达系统[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 365–368.
- [13] Goldsmith J E M, Blair F H, Bisson S E, et al. Turn-key Raman lidar for profiling atmospheric water vapor, clouds, and aerosols[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(21): 4979–4990.
- [14] Xie Chenbo. Development of the mobile raman-mie scattering lida [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
 谢晨波. 车载式 Raman-Mie 散射激光雷达的研制 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [15] Wu Decheng. Study of lidar measurement of atmospheric aerosol and error analysis [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
 吴德成. 大气气溶胶的激光雷达探测及其误差分析研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [16] Du Qicheng, Xu Chidong, Ji Yufeng. Development of transmission coaxial micro pulse lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(5): 357–360. (in Chinese)
 杜其成, 徐赤东, 纪玉峰. 透射式同轴微脉冲激光雷达研制[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(5): 357–360.
- [17] Xu Chidong, Ji Yufeng. Research and application of MPL–A1/T micro pulse lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(5): 337–343. (in Chinese)
 徐赤东, 纪玉峰. MPL–A1/T 型微脉冲激光雷达的研制与应用[J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(5): 337–343.
- [18] Wu Decheng, Liu Bo, Qi Fudi, et al. Tropospheric aerosols optical properties measured by a Raman-Mie lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, 6 (1): 18–26. (in Chinese)
 吴德成, 刘博, 戚福弟, 等. Raman-Mie 激光雷达测量对流层大气气溶胶光学特性[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6 (1): 18–26.
- [19] Wu Jian, Yang Chunping, Liu Jianbin. Theory of Light Propagation in Atmosphere [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2005. (in Chinese)
 吴健, 杨春平, 刘建斌. 大气中的光传输理论. 北京: 北京邮电大学出版社. 2005
- [20] Song Zhengfang. Foundation of Applied Atmospheric Optics [M]. Beijing: Meteorological Press, 1990. (in Chinese)
 宋正方. 应用大气光学基础. 北京: 气象出版社. 1990.
- [21] Henniger H, Wilfert O. An introduction to free-space optical communications[J]. *Radioengineering*, 2010, 19(2): 203–212.